

**LAPORAN AKHIR**  
**PENELITIAN DISERTASI DOKTOR**



**Pengembangan Sistem Deteksi Gas CO Berkepekaan Tinggi  
Pada Gas Kelumit Bertekanan Rendah Berbasis  
Spektroskopi ICOS**

**PENELITI:**

**RESTU WIDIATMONO, S.Si, M.Si**  
**NIDN : 0022057202**

**Dibiayai oleh DIPA** Direktorat Penelitian Pengabdian kepada Masyarakat Nomor DIPA – 023.04.1.673453/2015, tanggal 14 November 2014, DIPA revisi 01 tanggal 03 Maret 2015.

**Skim: Penelitian Disertasi Doktor Tahun Anggaran 2015 Nomor:**  
**062/SP2H/PL/DIT.LITABMAS/H/2015 Tanggal 5 Februari 2015**

**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT**  
**UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA**

**2015**

## HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Pengembangan Sistem Deteksi Gas CO Berkepekaan Tinggi Pada Gas Kelumit Bertekanan Rendah Berbasis Spektroskopi ICOS

**Peneliti/Pelaksana**

Nama Lengkap : RESTU WIDIATMONO S.Si.,M.Si.

Perguruan Tinggi : Universitas Negeri Yogyakarta

NIDN : 0022057202

Jabatan Fungsional : Asisten Ahli

Program Studi : Fisika

Nomor HP : 08156866315

Alamat surel (e-mail) : restu@uny.ac.id

Institusi Mitra (jika ada) : -

Nama Institusi Mitra : -

Alamat : -

Penanggung Jawab : -

Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 1 tahun

Biaya Tahun Berjalan : Rp 47.500.000,00

Biaya Keseluruhan : Rp 0,00



Mengetahui,  
Dekan FMIPA UNY

(Dr. Hartono)

NIP/NIK 196203291987021002

Yogyakarta, 9 - 11 - 2015

Ketua,

(RESTU WIDIATMONO S.Si.,M.Si.)

NIP/NIK 197205221998021001



Menyetujui,  
Ketua LPPM UNY

(Prof. Dr. Anik Ghufro)

NIP/NIK 196211111988031001

## RINGKASAN

Gas hembus pernapasan manusia memiliki banyak gas, salah satunya gas karbon monoksida (CO), yang dapat berfungsi sebagai *biomarker* penyakit tertentu atau tingkat kesehatan seseorang. Telah dikembangkan dalam penelitian ini detektor gas hembus yang memiliki kepekaan dan akurasi yang tinggi serta mampu mendeteksi gas cuplikan dalam tekanan rendah untuk keperluan tersebut.

Sistem deteksi berbasis teknik spektroskopi *off-axis* ICOS (*Integrated Cavity Output Spectroscopy*) yang dikombinasikan dengan laser QCL (*Quantum Cascade Laser*) sebagai sumber radiasi telah dikembangkan dalam penelitian ini. Laser QCL dengan panjang gelombang laser sebesar 4610 nm, yang merupakan hasil simulasi yang telah dilakukan sebelumnya, digunakan sebagai sumber radiasi. Sel ICOS dengan panjang 15 cm yang dilengkapi dengan cermin *high-finesse* diaplikasikan sebagai sel gas cuplikan pada pengukuran gas hembus pernafasan manusia. Sel ini juga berfungsi sebagai rongga resonator untuk meningkatkan kebolehan serapan dengan lintasan optik efektif mencapai 400 m.

Penelitian telah melalui tahapan persiapan dan konfigurasi sistem, setup dan optimalisasi *off-axis* ICOS, kalibrasi pengukuran konsentrasi, dan ujicoba pengukuran pada konsentrasi gas kelumit sebesar 2 ppmv, 1 ppmv, dan 0,24 ppmv. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa batas deteksi sebesar 1 ppbv dalam waktu akuisisi kurang dari 2 detik telah berhasil dicapai. Batas deteksi terbaik diperoleh sebesar 0,2 ppbv dengan waktu akuisisi sebesar 62 detik. Hasil yang diperoleh memperlihatkan sistem deteksi berbasis ICOS ini telah optimal dan mencapai performa yang diharapkan.

Keywords: QCL, ICOS, Spektroskopi Serapan, CO, Gas Hembus Manusia

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
RINGKASAN.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
III. METODE PENELITIAN.....	8
3.1 Tahapan Penelitian.....	8
3.2 Metode Pengukuran dan Susunan Peralatan.....	10
3.3 Analisa Data.....	13
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	14
4.1 Penentuan Panjang Gelombang Laser QCL.....	14
4.2 Optimalisasi Daya Laser QCL.....	14
4.3 Pembuatan dan Optimalisasi Sel ICOS.....	15
4.4 Konfigurasi Sistem ICOS.....	16
4.5 Hasil Pengukuran Gas CO.....	19
4.6 Analisa Batas Deteksi Pengukuran gas CO .....	22
V. KESIMPULAN.....	24
DAFTAR PUSTAKA.....	25
PENGUNAAN ANGGARAN.....	28
BERITA ACARA SEMINAR HASIL PENELITIAN.....	29

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Gas hembus pernapasan manusia telah sangat umum diketahui mengandung lebih dari 1000 jenis senyawa gas yang berbeda (Dweik et.al, 2008). Seluruh komponen gas tersebut memiliki konsentrasi yang sangat jauh berbeda, mulai dari level persen ke level ppm (*part per million*) sampai level ppb (*part per billion*) dan bahkan lebih kecil lagi. Michael Phillips dalam *Breath Test Medicine* (1992) telah menyatakan bahwa gas hembus pernapasan terbagi atas dua komponen. 150 mL komponen pertama disebut sebagai udara “*dead-space*”, dimana hembusan berisi udara yang berasal dari bagian atas saluran pernapasan. Pada daerah ini tidak terjadi pertukaran gas. 350 mL sisa udara dikenal sebagai *alveolar breath*, datang dari paru-paru, dimana terjadi pertukaran gas antara darah dan udara dari luar.

Konsentrasi molekul yang terdapat di dalam gas hembus pernapasan manusia ini dapat digunakan sebagai penanda biologis (*biomarker*) untuk menentukan penyakit pernapasan atau tingkat kesehatan seseorang (Risby et.al. 2010). Gas *biomarker* telah dikenal sejak Hippocrates mendeklarasikan istilah *fetor oris* dan *fetor hepaticus* untuk mendeskripsikan hubungan antara penyakit dan bau mulut, sampai ke era dimana Lavoisier dan Laplace pada tahun 1784 memperlihatkan bahwa respirasi manusia akan menggunakan oksigen dan menghilangkan karbondioksida (Duven et.al., 1955). Gas sebagai biomarker mulai populer di era 1800-an ketika Anstie pada tahun 1874 sukses mengisolasi ethanol dari gas hembus manusia (Baldwin A.D, 1977).

Karbon monoksida (CO) walaupun lebih dikenal sebagai gas polutan yang berbahaya bagi manusia, sesungguhnya juga dihasilkan di dalam tubuh manusia dan dihembuskan ke luar melalui paru-paru. Kandungan gas CO pada gas hembus orang sehat berkisar antara 1 sampai 5 ppm (Mc.Curdy et.al, 2007). Gas CO ini dapat digunakan sebagai *biomarker* dari berbagai penyakit seperti indikasi gangguan hati, stres oksidatif, infeksi pernapasan, dan anemia (Wang et.al, 2009).

Pelacakan gas hembus manusia merupakan tugas yang tidak mudah. Hal ini disebabkan karena komponen gas hembus sangat bervariasi level konsentrasinya (dari ppmv, ppbv, sampai pptv) serta spektra molekul yang ada juga sangat berdekatan dan berpotensi saling mengganggu (Sowa dkk, 2010). Komponen gas (seperti nitric oxide (NO), karbon monoksida (CO), hidrokarbon, hidrokarbon peroksida, dan bahkan karbon disulfida), dalam gas hembus manusia dapat berfungsi sebagai *biomarker* sebagaimana telah dikompilasi oleh Zhou dkk. (Zhou dkk, 2012).

Saat ini penelitian mengenai aplikasi analisis gas hembus manusia untuk kepentingan diagnosa biomedis semakin intensif. Analisa gas hembus menggunakan metode serapan laser yang selektif dan berkepekaan tinggi memiliki banyak kelebihan seperti bersifat non invasif, mudah digunakan, mudah diulangi, dapat melakukan pengukuran secara *real time (online measurement)*, meminimalkan gangguan pada pasien, dan memiliki kemampuan mendeteksi perubahan pada tingkat molekuler (Wojtas dkk, 2012).

*Quantum cascade laser (QCL)* telah menempatkan diri sebagai sumber radiasi yang efektif bagi kebutuhan spektroskopi serapan laser/*laser absorption spectroscopy (LAS)* di rentang tengah inframerah atau panjang gelombang  $\sim 3 \mu\text{m}$  sampai  $\sim 24 \mu\text{m}$  yang dikenal sebagai daerah umum serapan vibrasi molekular. LAS telah banyak dikembangkan untuk berbagai level deteksi dan sampel gas menggunakan berbagai metode dan teknik (Kosterev dkk, 2008).

QCL gelombang kontinyu/*Continuous-wave (CW)* bertipe *distributed feedback (DFB)* dengan pendingin termoelektrik (TEC) telah digunakan untuk mendeteksi karbon monoksida (CO) menggunakan berbagai metode seperti *cavity ring down spectroscopy (CRDS)* (Fritsch dkk, 2007), *integrated cavity output spectroscopy (ICOS)* (Silva dkk, 2005), dan *quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS)* (Ma dkk, 2013).

Berbagai teknik spektroskopi juga telah sukses diimplementasikan pada upaya pendeteksian CO di berbagai kondisi mulai dari pengamatan atmosfer (Tao dkk, 2012), deteksi gas buang hasil pembakaran (Baron-Jimenez dkk, 2006), sampai dengan analisa gas hembus pernapasan manusia (Sowa dkk, 2010).

Penelitian terkini melaporkan bahwa teknik ICOS berbasis QCL telah terbukti merupakan metode yang sesuai bagi keperluan pendeteksian gas hembus pernapasan manusia (Marchenko dkk, 2013).

Pengembangan sistem untuk menghasilkan sistem deteksi gas CO berkepekaan tinggi pada gas kelumit bertekanan rendah, seperti pada hembusan pernapasan manusia, yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi kandungan CO perlu dikembangkan untuk menunjang kebutuhan penelitian di bidang biomedik. Pada penelitian ini akan dilakukan pengembangan dan pengukuran performa detektor gas CO pada gas kelumit bertekanan rendah dengan menggunakan teknik spektroskopi ICOS yang dikombinasikan dengan laser CW-DFB-QCL pada panjang gelombang 4.610 nm sebagai sumber radiasinya. Tingkat kepekaan yang diharapkan dapat dicapai adalah level sub ppbv pada konsentrasi CO cuplikan sebesar 1 ppmv.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Uraian pada latar belakang memperlihatkan adanya permasalahan utama yaitu bagaimana penerapan metode spektroskopi ICOS untuk keperluan pendeteksian gas CO. Hal ini dapat dicapai dengan menyelesaikan permasalahan mendasar yaitu:

1. Bagaimana setup spektroskopi ICOS berbasis laser QCL yang optimal?
2. Bagaimana setup sistem deteksi berbasis spektroskopi ICOS yang sesuai untuk mendeteksi gas CO pada gas kelumit bertekanan rendah?
3. Apakah sistem deteksi yang dibangun memiliki kepekaan dan kestabilan yang sesuai?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Membangun sistem spektroskopi ICOS berbasis laser QCL.
2. Membangun sistem deteksi gas CO pada gas kelumit bertekanan rendah menggunakan teknik spektroskopi ICOS.
3. Mencapai level deteksi gas CO pada kepekaan sub ppb menggunakan sistem deteksi gas berbasis spektroskopi ICOS.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Dari segi akademik, manfaat penelitian ini terutama untuk memperkaya kemampuan kognitif dan motorik penulis mengenai teori dan teknik spektroskopi ICOS khususnya pada deteksi gas CO. Secara spesifik diharapkan penelitian ini memiliki kegunaan:

1. Dapat digunakannya perangkat sistem deteksi gas CO berkepekaan tinggi untuk menunjang penyelesaian disertasi doctoral.
2. Dapat digunakannya perangkat sistem deteksi gas CO untuk pengukuran gas hembus pernapasan manusia.
3. Sistem deteksi yang dikembangkan dapat membuka wawasan baru dalam penelitian di bidang biomedik.
4. Hasil pengukuran yang diperoleh dapat memperkaya khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi terutama struktur atom dan molekuler dan penerapannya.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Zhou dkk. (2012) menyatakan bahwa sebagian besar teknik yang digunakan untuk mendeteksi gas CO, menggunakan sensor elektrokimia yang sensitif dan cukup murah tetapi dengan hasil yang cukup memadai. Akan tetapi sensor ini rentan terhadap gangguan yang muncul dari kandungan gas lain yang cukup besar. Perangkat lain adalah *near-infrared CO analyzers*, umum digunakan untuk memonitor CO di atmosfer, yang terbukti cukup stabil dan sensitif. Kelemahan analisator ini adalah ukurannya yang sangat besar, peka terhadap air dan karbondioksida, dan membutuhkan cuplikan dalam jumlah besar.

Tabel 1 berikut memperlihatkan pendeteksian gas CO menggunakan berbagai teknik yang ada beserta batas deteksi yang dicapai.

Tabel 1. *State of the art* Deteksi CO

Penulis, Jurnal dan Tahun	Judul	Metode	Hasil yang diperoleh
Lapostolle <i>et al</i> , Resuscitation Vol. 64, Elsevier Pub. (2004)	Measurement of carbon monoxide in simulated expired breath	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO Portable Detector</li> <li>• Infrared Spectrometer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batas deteksi 60 – 100 ppm.</li> </ul>
Moeskops <i>et al</i> , Appl. Phys. B 82, 649–654 (2006)	Quantum cascade laser-based carbon monoxide detection on a second time scale from human breath	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TDLAS</li> <li>• Multipass cell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batas deteksi 40 ppb pada 50 mbar</li> </ul>
Mc.Curdy <i>et al</i> , Journal of Breath Research, IOP Publishing (2007)	Recent advances of laser-spectroscopy-based techniques for applications in breath analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ICOS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batas deteksi 175 ppbv</li> </ul>
Costello <i>et al</i> , J. Breath Res. 2 (2008) 037011	A sensor system for monitoring the simple gases hydrogen, carbon monoxide, hydrogen sulfide, ammonia and ethanol in exhaled breath	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrochemical sensor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batas deteksi 0.4 ppm</li> </ul>
Marcus Sowa <i>et. Al.</i> , Journal of Breath Research, Vol.4, IOP Publishing (2010)	Mid-infrared laser spectroscopy for online analysis of exhaled CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cavity leak-out spectroscopy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batas deteksi 7 ppb Hz–1/2</li> </ul>
Wojtas <i>et al</i> , OPTO-ELECTRONICS REVIEW 20(1), 26–39 (2012)	Ultrasensitive laser spectroscopy for breath analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OFC-CEAS</li> <li>• TDLAS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batas deteksi 900 ppb pada 1.6 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Batas deteksi 0.5 ppm pada 4.6 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>

ICOS atau *Off-axis cavity enhanced absorption spectroscopy* (CEAS) adalah varian penting dari CRDS yang pertama kali dipublikasikan pada tahun 1998. Pada ICOS, cahaya akan terkopel di dalam rongga resonator dan spektra serapan dapat diperoleh dari kumpulan sinyal cahaya yang ditransmisikan melalui rongga resonator yang memiliki cermin berefektivitas tinggi (*high finesse*) (O'Keefe, 1998). Sebuah rongga resonator *high finesse* juga berfungsi sebagai filter spektral yang akan menyempitkan lebar garis dari berkas laser yang melewatinya (O'Keefe dkk., 1999).

Penjajaran berkas cahaya dalam rongga resonator menggunakan pendekatan geometri secara *off-axis* (OA) dapat secara sistematis menghilangkan terjadinya resonansi antar berkas yang umum terjadi di dalam rongga resonator, tetapi dengan tetap mempertahankan penguatan sinyal serapan yang ada (B. Paul dkk, 2001). OA-ICOS secara efektif dapat mengurangi rentang spektral bebas/*free spectral range* (FSR) dan memberikan peluang untuk dapat melakukan pengukuran yang berkepekaan tinggi (Engel dkk, 2006 dan Baer dkk, 2002).

Daya laser yang melalui rongga resonator dalam pendekatan penjajaran berkas secara *off-axis* dapat dinyatakan sebagai (Manne dkk, 2010)

$$I = I_0 C_p \frac{(1-R)^2}{2[(1-R)+k]} \quad (1)$$

$I_0$  adalah daya laser yang datang,  $R$  adalah tetapan reflektivitas cermin,  $C_p$  adalah parameter *spatial coupling* (dengan tetapan nilai antara 0 dan 1), dan  $k$  adalah koefisien serapan.  $C_p$  dinyatakan dengan nilai 1 untuk menggambarkan kondisi serapan yang lemah dan *spatial coupling* yang sempurna antara ragam rongga resonator dan berkas laser. Jika  $kL \ll (1-R)$ , maka persamaan (1) menjadi

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1-R}{2} \left( 1 - \frac{kL}{1-R} \right) \quad (2)$$

Informasi mengenai serapan dapat diperoleh dengan mengetahui panjang lintasan optik efektif di dalam rongga pada konfigurasi geometris yang ada. Panjang lintasan efektif  $P_{\text{eff}}$  dinyatakan sebagai (Manne dkk, 2010)

$$P_{\text{eff}} = \frac{L}{1-R_{\text{eff}}} \quad (3)$$

$R_{\text{eff}}$  adalah tetapan reflektivitas cermin efektif. Nilai  $P_{\text{eff}}$  akan lebih kecil dibandingkan nilai panjang lintasan sebenarnya sebesar  $P = L/(1-R)$ . Hal ini disebabkan nilai  $R_{\text{eff}}$  lebih kecil daripada nilai  $R$  yang terukur pada kondisi ragam  $\text{TEM}_{00}$  (Manne dkk, 2010). Serapan di dalam rongga resonator kemudian dapat dinyatakan sebagai

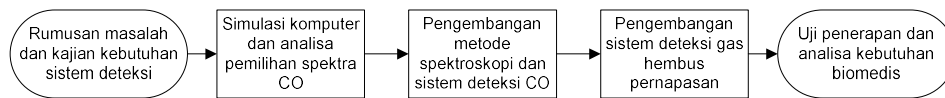
$$A = \frac{kL}{(1-R_{\text{eff}})+kL} \quad (4)$$

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

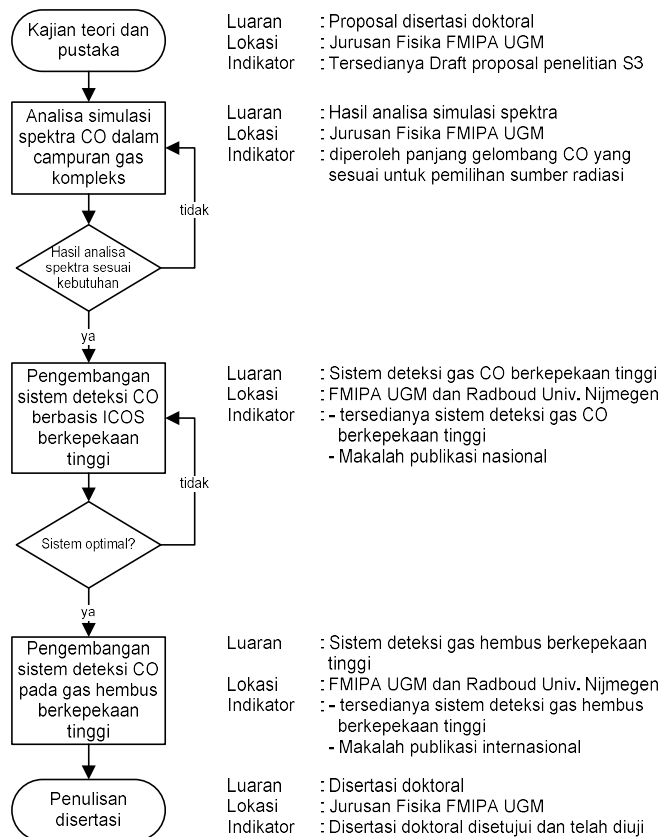
#### 3.1. Tahapan Penelitian

Pembangunan sistem deteksi mengikuti beberapa tahapan seperti pada bagan di gambar 1. Bagan pada gambar 1 memperlihatkan bahwa sebelum pengembangan sistem deteksi CO perlu dikerjakan simulasi komputer dan analisisnya untuk menentukan panjang gelombang serapan yang sesuai.



Gambar 1. Tahapan rancang bangun detektor sensitif gas hembus pernafasan untuk identifikasi gas CO.

Tahapan penelitian dalam rangka disertasi doctoral beserta luaran yang diperoleh pada setiap tahapan diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2. Tahapan penelitian S3

Tahapan pada gambar 2 memperlihatkan bahwa penelitian hibah doktor yang diajukan merupakan bagian dari penelitian S3 secara keseluruhan, dimana penelitian hibah doktor ini akan menjamin tersedianya sistem deteksi gas CO berkepekaan tinggi pada gas kelumit bertekanan rendah yang menjadi dasar bagi pengembangan sistem deteksi gas hembus pernafasan manusia.

Salah satu faktor penting dalam penerapan sistem spektroskopi yang tepat adalah pemilihan sumber radiasi yang sesuai. Panjang gelombang laser yang digunakan harus sesuai dengan panjang gelombang resonan dari transisi molekuler yang dipilih. Sistem deteksi yang dikembangkan diharapkan mampu mendeteksi kandungan gas CO dalam campuran gas yang kompleks dan bertekanan rendah, seperti dalam gas hembus pernafasan manusia, maka aspek pemilihan tidak hanya melihat panjang gelombang resonan yang sesuai dengan transisi CO saja tetapi juga perlu mempertimbangkan beberapa faktor yaitu:

1. Daerah spektral yang dipilih harus sebebaskan mungkin dari spektra unsur lain terutama molekul air dan karbondioksida.
2. Tersedianya informasi yang cukup mengenai struktur atom atau molekul dari panjang gelombang yang dipilih pada database atom dan molekul seperti Hitran 2008.
3. Tersedianya sumber laser yang sesuai untuk daerah panjang gelombang yang dipilih. Sumber laser ini harus memiliki daya yang cukup kuat dan stabil pada pemakaian dalam jangka waktu yang cukup lama.

Pemilihan panjang gelombang yang tepat dilakukan dengan membuat simulasi komputer mengenai rentang panjang gelombang serapan CO dalam campuran gas kompleks yang sesuai dengan kondisi gas hembus pernafasan. Hasil simulasi kemudian dianalisa dan dilakukan pemilihan panjang gelombang yang sesuai dengan ketentuan pada tiga faktor di atas. Simulasi ini dilakukan menggunakan program *spectral analysis* berdasarkan database Hitran 2008 (Rothman dkk, 2009), dengan membandingkan spektrum CO dengan spektrum komponen gas lain di dalam gas hembus pernafasan yang memiliki kemungkinan mengganggu pengukuran. Komponen gas yang disertakan dalam simulasi ditampilkan pada tabel 1.

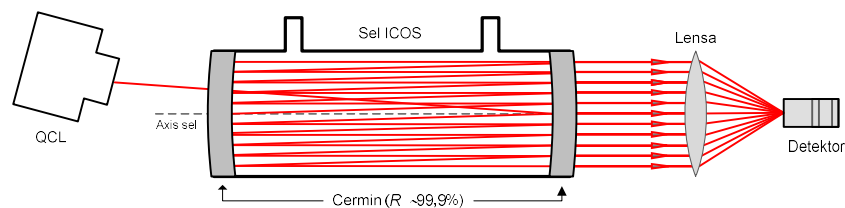
Tabel 1. Komponen dan konsentrasi gas yang diperhitungkan dalam simulasi

No	Gas	Konsentrasi
1	Karbon Monoksida (CO)	10 ppbv
2	Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> )	5 %
3	Air (H <sub>2</sub> O)	5 %
4	Methane (CH <sub>4</sub> )	2 ppmv

Tahapan selanjutnya adalah pengembangan sistem deteksi gas CO berkepekaan tinggi pada gas kelumit bertekanan rendah sebagaimana yang diajukan dalam hibah penelitian disertasi ini. Sistem deteksi yang dikembangkan berbasis spektroskopi ICOS yang akan diutarakan pada bagian berikut laporan ini.

### 3.2. Metode Pengukuran dan Susunan Peralatan

Spektroskopi ICOS didasarkan pada teknik serapan dengan sel ICOS seperti yang diperlihatkan pada gambar 3. Cahaya akan terkopel di dalam rongga resonator dan sinyal serapan diperoleh dari integrasi seluruh sinyal yang ditransmisikan melalui sel resonator (O'Keefe, 1998). Hal ini serupa dengan proses pada pengukuran serapan secara konvensional. Perbedaannya adalah panjang lintasan optik pada ICOS dapat dikatakan tak terhingga karena cahaya akan melalui jalur yang sama setiap kali melewati sel. Sel resonator *high finesse* juga berfungsi sebagai filter spektral yang akan menyempitkan lebar garis dari berkas laser yang melewatinya (O'Keefe dkk., 1999).



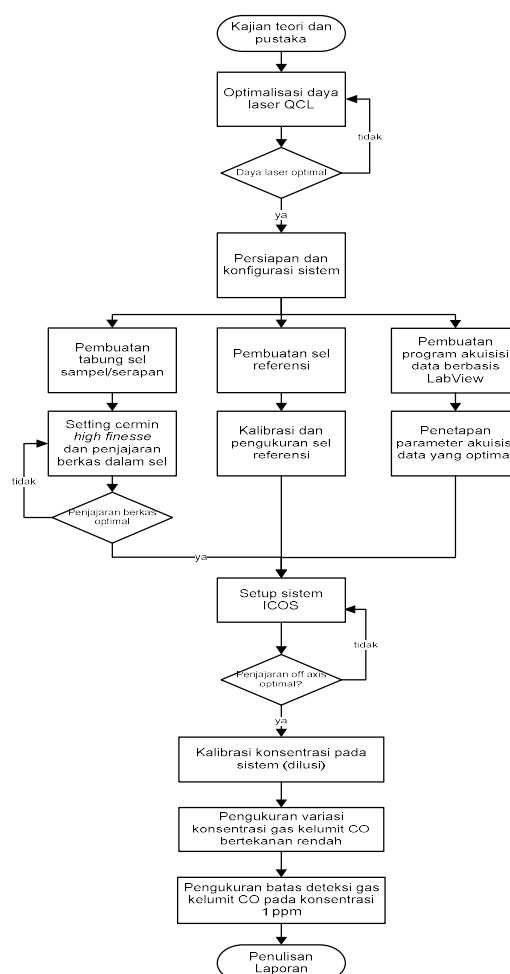
Gambar 3. Skema perambatan berkas laser dalam ICOS

Penjajaran berkas cahaya dalam rongga resonator menggunakan pendekatan geometri secara *off-axis* (OA) dapat secara sistematis menghilangkan terjadinya resonansi antar berkas yang umum terjadi di dalam sel resonator, tetapi dengan tetap mempertahankan penguatan sinyal serapan yang ada (B. Paul dkk, 2001). OA-ICOS secara efektif dapat mengurangi rentang spektral bebas/*free spectral range* (FSR)

dan memberikan peluang untuk dapat melakukan pengukuran yang berkepekaan tinggi (Engel dkk, 2006 dan Baer dkk, 2002).

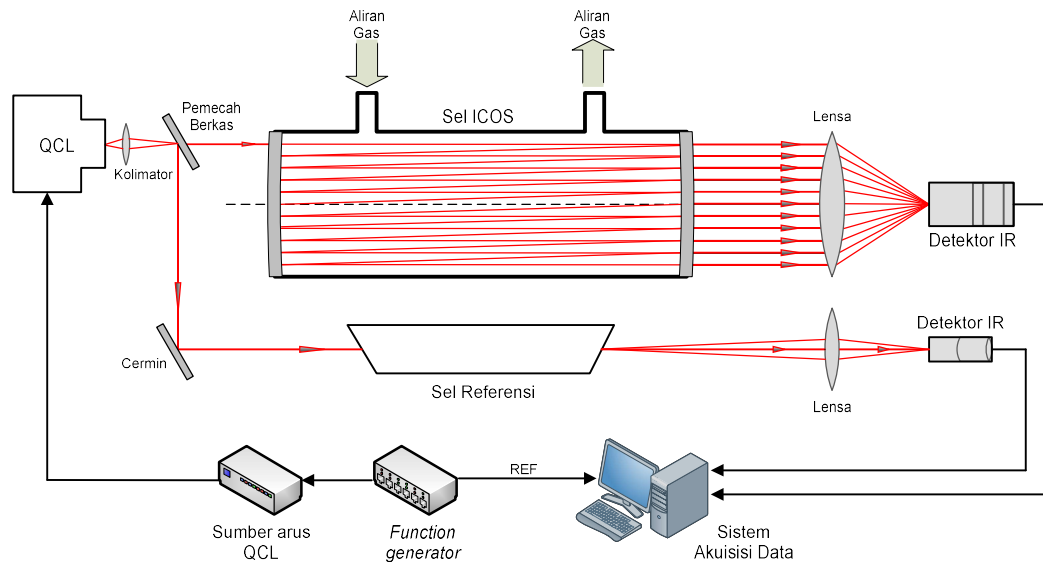
Teknik ini sesuai karena gas kelumit yang digunakan bertekanan rendah, serupa dengan hembusan pernafasan (Silva dkk, 2005). Sistem ICOS yang digabungkan dengan laser QCL, merupakan teknik yang akurat dan cocok digunakan dalam analisis aliran gas yang berbeda-beda dibandingkan dengan *chemiluminescence analyzers* atau *electrochemical sensors* (Mandon dkk, 2012). Laser QCL juga sesuai jika dikombinasikan dengan teknik spektroskopi ICOS untuk mendapatkan sensitivitas yang tinggi pada pengukuran gas hembus dan biogenik (Marchenko dkk., 2013).

Langkah-langkah pengembangan sistem deteksi CO berbasis spektroskopi ICOS dilakukan berdasarkan diagram alir seperti pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir pembangunan sistem deteksi gas CO berbasis ICOS

Rangkaian peralatan penelitian sistem deteksi gas CO berkepekaan tinggi pada gas kelumit bertekanan rendah menggunakan teknik spektroskopi ICOS ini diperlihatkan pada gambar 5.



Gambar 5. Bagan susunan alat ICOS berbasis QCL untuk deteksi gas CO.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Sistem laser QCL, berupa *single mode* CW-DFB-QCL tipe M9501 buatan Maxion Inc. berpendingin *peltier Thermoelectric Cooled* (TEC) yang bekerja pada panjang gelombang  $2169,2 \text{ cm}^{-1}$  atau  $4610 \text{ nm}$ . Perangkat sumber arus (QCL *current driver*) dan sistem pendingin untuk mengatur arus, tegangan, dan suhu pendingin QCL. QCL ditempatkan pada sungkup (QCL *mount*) dengan kolimator dan dihubungkan dengan sumber arus dan pengontrol suhu.
2. Detektor inframerah berkepekaan tinggi yang mampu menangkap perubahan sinyal serapan dan memiliki rentang tanggap frekuensi optimal di panjang gelombang laser QCL dan mampu bekerja pada daya laser QCL. Detektor yang digunakan adalah detektor sensitif infra merah (IR) berpendingin 4 tahap VIGO PVI4TE untuk menangkap sinyal ICOS, dan detektor IR suhu kamar untuk menangkap sinyal referensi.
3. Perangkat akuisisi data berupa:
  - a. kartu DAQ (*data acquisition*) GaGe CompuScope 14200, 12 bit dengan



- internal/eksternal trigger sampai 20 KHz yang mampu memberikan modulasi sinyal triangular.
- b. Perangkat komputer dengan spesifikasi: prosesor 1 GHz dual core, RAM 2 GB, dan sistem operasi Windows XP.
  - c. Perangkat lunak akuisisi data GageScope dan bahasa pemrograman LabView.
4. Perangkat optik seperti lensa, cermin pemantul, dan pemecah berkas (*beam splitter*) yang memiliki tanggap frekuensi di daerah panjang gelombang IR dan mampu menahan daya laser QCL.
  5. Tabung sel serapan buatan sendiri berbahan aluminium dengan panjang 10 dan 15 cm dengan Dua buah cermin laser reflektivitas tinggi ( $R \sim 99\%$ ).
  6. Tabung sel referensi buatan sendiri berbahan gelas dengan ukuran yang dianggap memadai untuk menampung gas CO referensi.
  7. Sistem pengisian gas berupa: pompa vakum, pengatur kecepatan aliran gas (*mass flow controller*), selang, dan *valve*.
  8. Tabung Gas CO dengan konsentrasi 10 ppm dan 100 ppm sebagai sumber gas CO. Tabung gas N<sub>2</sub> sebagai sumber gas pelarut (*solvent*) yang akan digunakan untuk variasi konsentrasi gas CO. Gas N<sub>2</sub> juga difungsikan sebagai sarana kondisi tanpa gas CO atau kalibrasi nol.

### 3.3. Analisa data

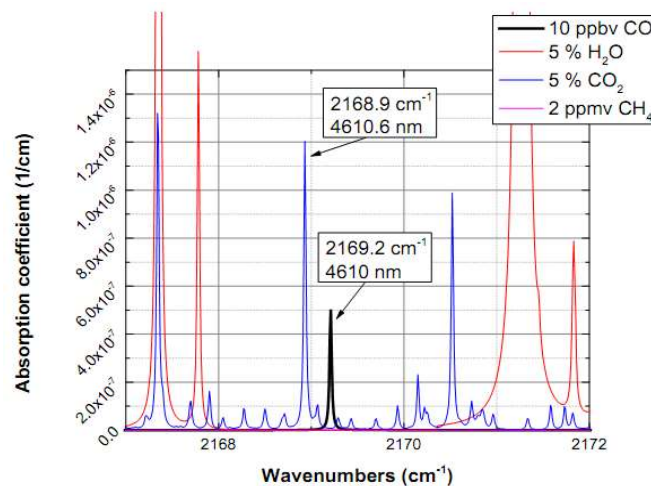
Data pengukuran diolah langsung menggunakan sistem akuisisi data dan ditampilkan pada layar monitor. Batas deteksi dari sistem ICOS berbasis QCL, yang memberikan gambaran kuantitatif dari kestabilan dan pencapaian kepekaan detektor, diperoleh dengan melakukan analisa data menggunakan standar deviasi dari *Allan variance*. Nilai *Allan variance* dapat menentukan batas deteksi sistem dengan menampilkan besaran derau (*noise*) sebagai fungsi dari paduan waktu pengukuran (Werle dkk, 1993).

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4. 1. Penentuan Panjang Gelombang Laser QCL

Hasil simulasi menunjukkan spektra CO sebagian besar berada di dalam pengaruh spektra komponen lain yang memiliki kandungan yang jauh lebih besar. Hasil analisa dapat menentukan satu panjang gelombang yang terbaik untuk kepentingan pengukuran gas hembus pernafasan yaitu pada panjang gelombang 4610 nm seperti diperlihatkan pada gambar 6, sesuai dengan hasil analisa dari berbagai panjang gelombang yang dimiliki oleh transisi molekuler CO (Widiatmono dkk., 2014).

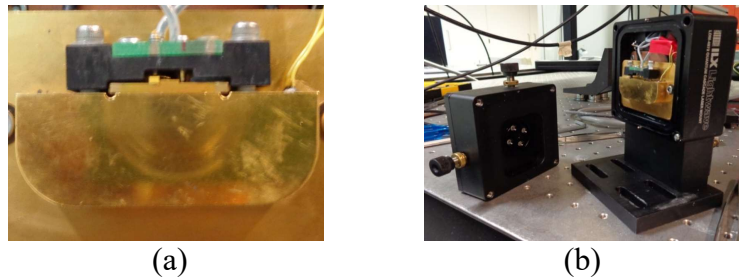


Gambar 6. Hasil simulasi spektra gas CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> di daerah panjang gelombang 4610 nm.

Maka sistem spektroskopi ICOS dibangun menggunakan laser DFB-CW-QCL dengan panjang gelombang 4610 nm.

#### 4. 2. Optimalisasi Daya Laser QCL

Laser QCL sebelum dapat digunakan sebagai sumber radiasi harus terlebih dahulu dilakukan pengukuran daya laser optimal pada kondisi terbuka dan menggunakan penyearah (*collimator*). Laser dipasang pada sungkup yang dihubungkan dengan rangkaian penyedia arus dan pendingin (Gambar 7).



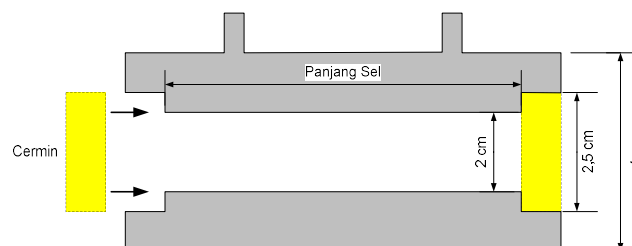
Gambar 7. (a) Laser QCL dan (b) sungkup laser

Laser yang digunakan adalah laser *single mode* CW-DFB-QCL tipe M9501 buatan Maxion Inc dengan pendingin *peltier Thermoelectric Cooled* (TEC) dengan panjang gelombang  $2169,2 \text{ cm}^{-1}$  atau  $4610 \text{ nm}$ . Pendinginan laser cukup menggunakan air untuk mempertahankan suhu sistem laser pada  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Hasil uji karakteristik laser QCL yang dilakukan menyatakan bahwa *laser threshold* pada suhu  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan arus  $I = 318 \text{ mA}$  dan tegangan  $V = 9,388 \text{ V}$ . Operasional laser pada deteksi CO dilakukan pada kondisi operasional arus  $I = 418 \text{ mA}$  dan  $V = 9,799 \text{ V}$ . Pada kondisi operasional ini daya laser mencapai  $\approx 40 \text{ mW}$ . Arus QCL dimodulasi dengan sinyal triangular  $12 \text{ kHz}$ .

#### 4. 3. Pembuatan dan optimalisasi sel ICOS

Hal utama pada bagian ini adalah pembuatan dan penyiapan sel ICOS. Sel ini terbuat dari silinder alumunium berongga yang diberi lubang untuk masukan dan keluaran gas cuplikan. Agar sel bersifat *high finesse* maka pada kedua ujung sel ini dipasang sepasang cermin dengan koefisien reflektivitas yang tinggi ( $R \sim 99,7\%$ ) dari CRD Optics seri 520 yang optimal pada panjang gelombang  $4,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Dimensi sel ICOS yang dapat disesuaikan adalah bagian panjang saja, karena diameter silinder harus menyesuaikan besar diameter cermin yang sebesar  $1'' (\approx 2,54 \text{ cm})$ . Gambar 8 berikut memperlihatkan skema dan dimensi sel ICOS

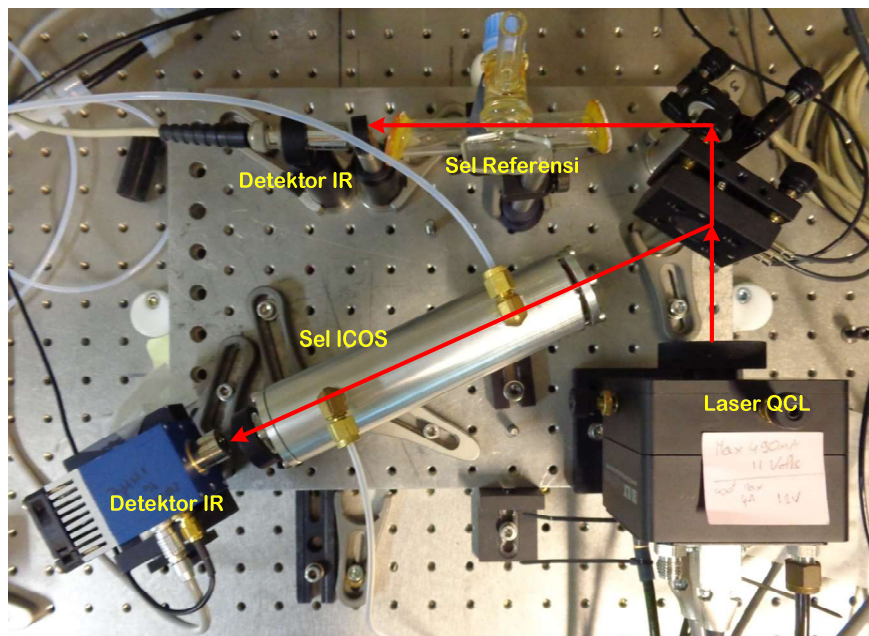


Gambar 8. Skema dan dimensi sel ICOS

Pemasangan cermin tentu saja membutuhkan teknik penjajaran berkas, agar berkas dapat dipantulkan bolak-balik secara optimal. Pada penelitian ini dilakukan percobaan dengan dua panjang sel. Panjang sel yang pertama adalah 5 cm dan yang kedua adalah 15 cm. Hal ini dilakukan untuk menguji apakah panjang sel yang sangat pendek dapat diset sebagai sel ICOS dengan mudah atau tidak. Sel yang pendek memiliki kelebihan hanya membutuhkan jumlah cuplikan yang sangat kecil dengan *refresh rate* yang tinggi. Sebaliknya pada sel yang panjang, akan lebih mudah untuk dilakukan penjajajaran berkas agar tidak terjadi interferensi antar berkas.

#### 4. 4. Konfigurasi Sistem ICOS

Konfigurasi sistem ICOS merujuk pada susunan alat seperti yang ditunjukkan sebelumnya pada gambar 5. Sel ICOS yang telah siap kemudian ditempatkan di dalam setup alat tersebut, seperti yang diperlihatkan pada gambar 9 berikut ini.

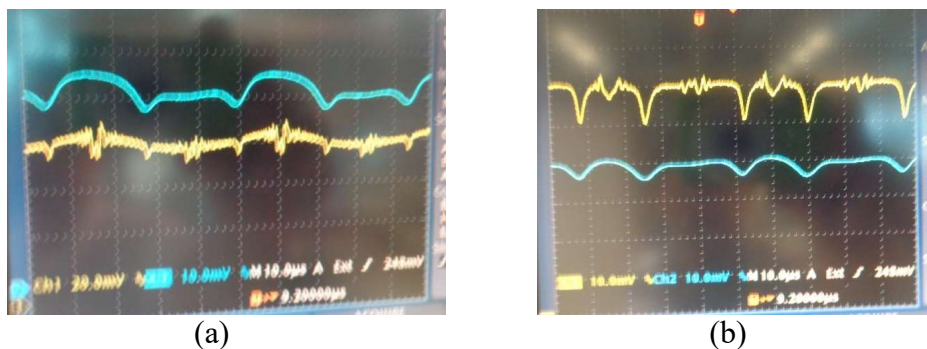


Gambar 9. Konfigurasi sistem ICOS

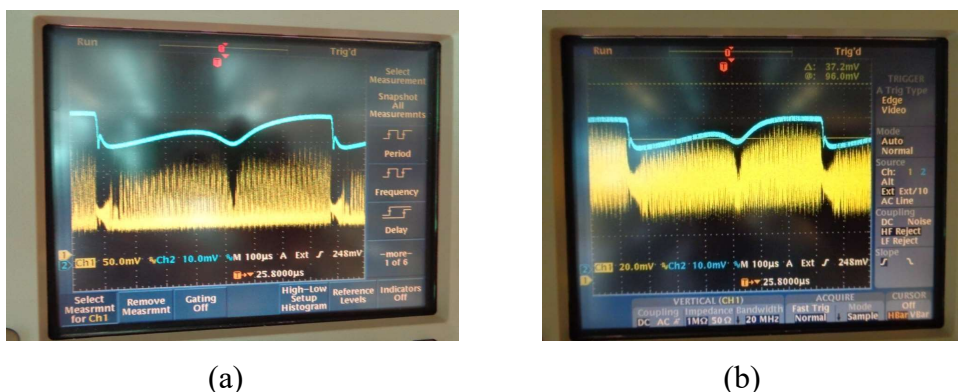
Sel referensi berisi gas CO dengan kandungan 1 % pada tekanan 1 atm. Referensi ini digunakan sebagai pembanding sinyal serapan CO agar sistem akuisisi data

dapat langsung menentukan kadar konsentrasi CO yang terukur serta untuk mengetahui apakah panjang gelombang laser mengalami pergeseran atau tidak yang dikenal dengan istilah *laser drift*.

Konfigurasi OA-ICOS dilakukan dengan mengubah-ubah posisi sel ICOS terhadap berkas laser yang datang sampai diperoleh sinyal serapan terintegrasi yang paling optimal, yaitu intensitas sinyal yang tinggi tetapi dengan derau yang rendah. Konfigurasi ini dilakukan pada kondisi aliran gas CO dengan konsentrasi 1 ppm dengan tekanan 80 mBar. Konfigurasi optimal dapat dilihat pada sinyal serapan CO yang tampak pada layar osiloskop yang digunakan, dimana sinyal serapan memperlihatkan garis yang dalam (gambar 10) dan rapat sinyal yang padat dengan derau yang rendah (gambar 11). Garis kuning merupakan sinyal yang berasal dari sel ICOS, sementara garis biru adalah sinyal yang berasal dari sel referensi.

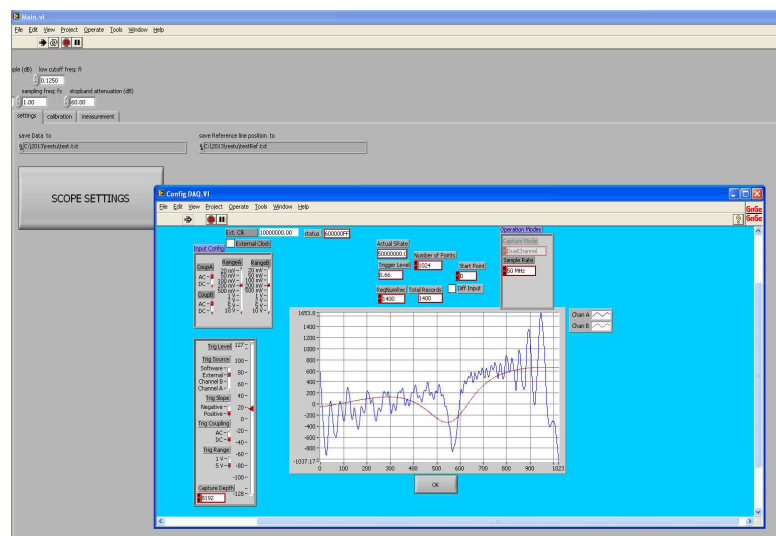


Gambar 10. Sinyal serapan CO pada 4610 nm yang melalui sel ICOS pada kondisi (a) sebelum dan (b) sesudah dioptimasi.

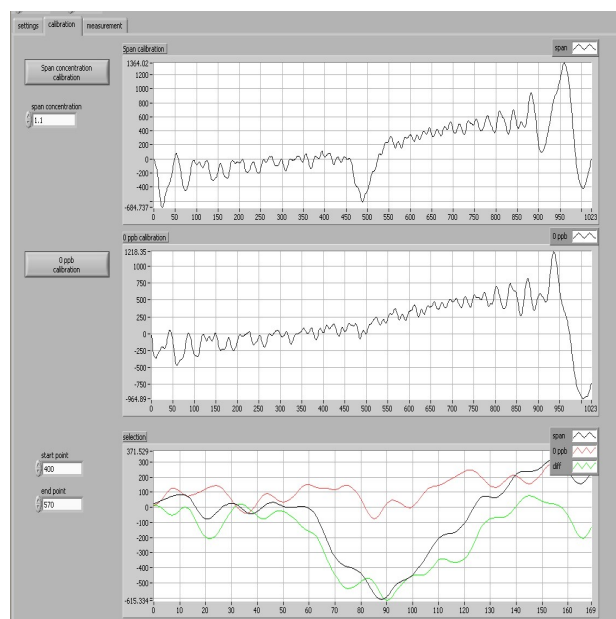


Gambar 11. Sinyal serapan CO yang melalui sel ICOS per satuan waktu pada kondisi (a) sebelum dan (b) sesudah dioptimasi.

Pengukuran dilakukan dengan sistem akuisisi data menggunakan kartu Gage DAC (*digital to analog converter*) tipe CompuScope 14200 dengan perangkat lunak GageScope. Data yang diperoleh kemudian digunakan pada program antarmuka pengukuran yang dikembangkan menggunakan LabView seperti diperlihatkan pada gambar 12, 13 dan 14.

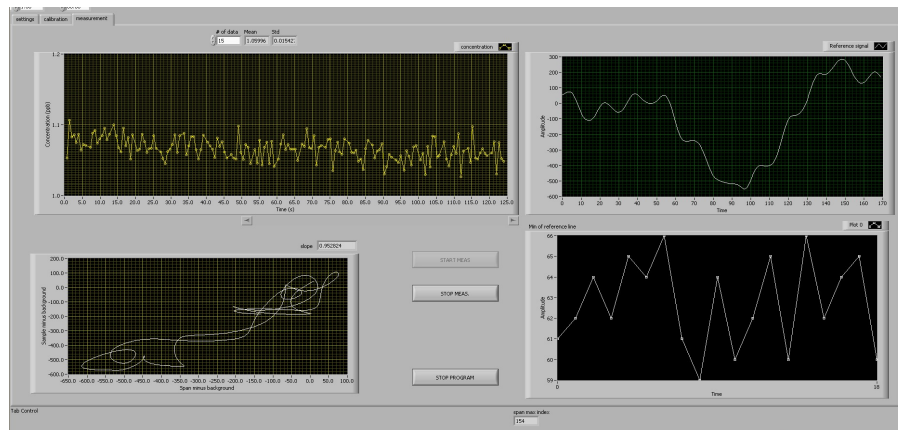


Gambar 12. Tampilan antarmuka program yang memperlihatkan sinyal serapan CO dan referensi.



Gambar 13. Tampilan antarmuka program yang memperlihatkan kalibrasi nol sinyal serapan CO.

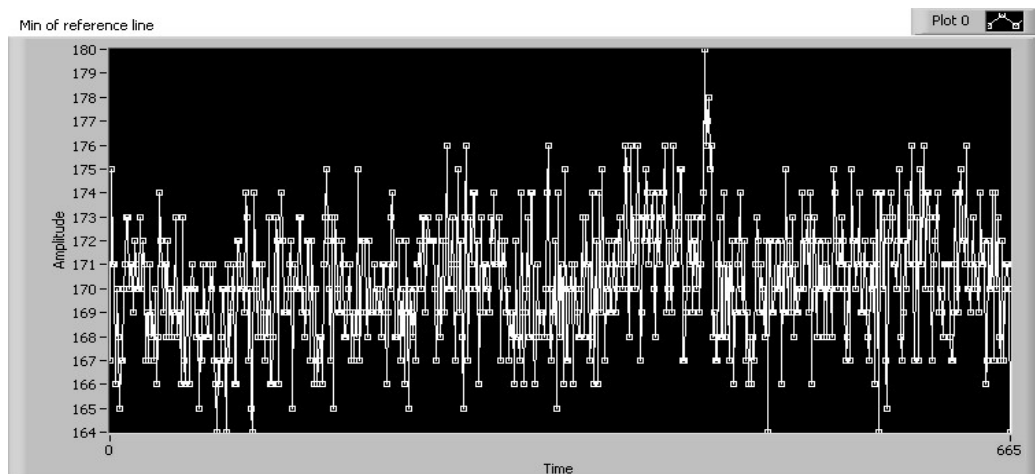




Gambar 14. Tampilan antarmuka program yang memperlihatkan layar pengukuran konsentrasi gas CO, stabilitas sinyal, perbandingan sinyal dan referensi, serta *laser drift*.

#### 4. 5. Hasil Pengukuran Gas CO

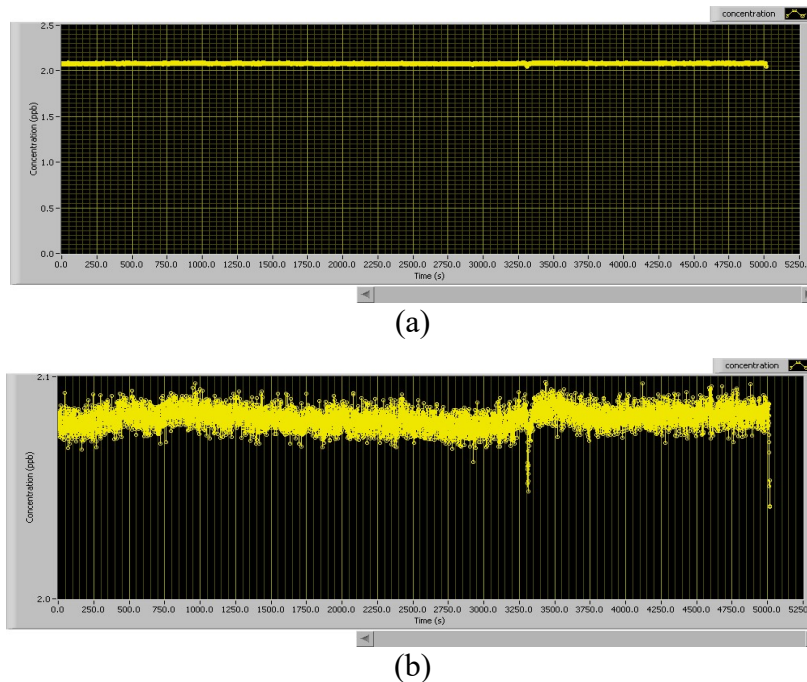
Gambar 15 memperlihatkan kestabilan laser yang digunakan dalam pengukuran gas CO. Laser terlihat cukup stabil dalam pengertian tidak terjadi *laser drift* atau pergeseran panjang gelombang.



Gambar 15. Sinyal amplitudo laser yang naik turun pada daerah sempit dan tetap memperlihatkan kestabilan laser yang cukup baik.

Untuk mengetahui performa konfigurasi sistem ICOS dan program antarmuka yang telah dihasilkan maka dilakukan pengukuran gas CO pada berbagai konsentrasi. Pengukuran yang dilakukan bertujuan untuk mengukur performa sistem ICOS berbasis QCL yang dikembangkan dalam mengidentifikasi gas CO

pada kondisi umum gas buang pernapasan dengan tingkat kepekaan sub ppb. Pengukuran pertama dilakukan pada konsentrasi 2 ppmv pada tekanan 80 mBar, dengan hasil pengukuran ditampilkan pada gambar 16.



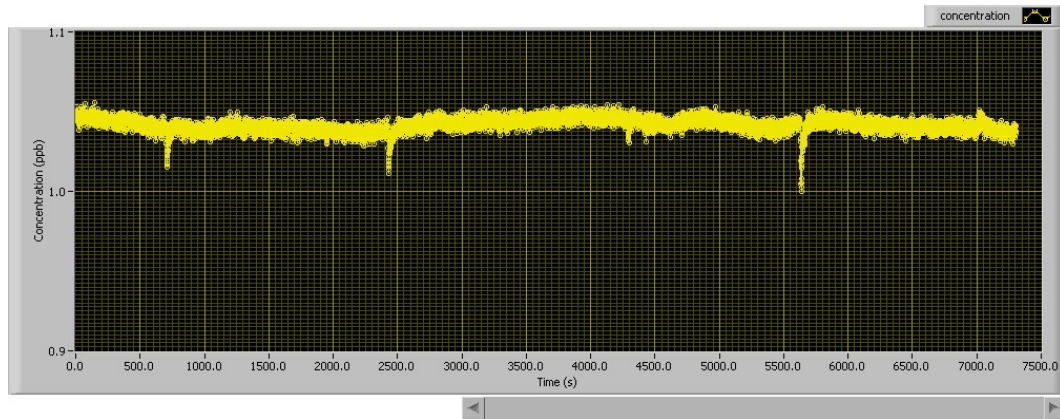
Gambar 16. Hasil pengukuran konsentrasi CO sebesar 2 ppmv pada tekanan 80 mBar. (a) Skala sebenarnya dan (b) Skala diperbesar.

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa CO telah terukur cukup stabil dengan konsentrasi yang sesuai. Pada skala yang diperbesar terlihat ada gangguan yang diketahui dari adanya sinyal “jatuh”. Hal ini diakibatkan adanya gangguan mekanik pada sistem karena sensitivitasnya yang tinggi.

Pengukuran berikutnya dilakukan dalam kondisi pengukuran yang sesuai dengan kondisi umum gas hembus pernafasan manusia. Pengukuran yang dilakukan adalah pada konsentrasi gas CO sebesar 1 ppmv dalam  $N_2$ . Sistem dijalankan selama lebih dari dua jam (sampai 7.300 s) dan pengukuran dilakukan secara bersamaan. Sistem dapat menampilkan pengukuran konsentrasi gas CO secara visual, sementara pada saat bersamaan data mentah disimpan dalam bentuk file teks. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa pengukuran CO dapat

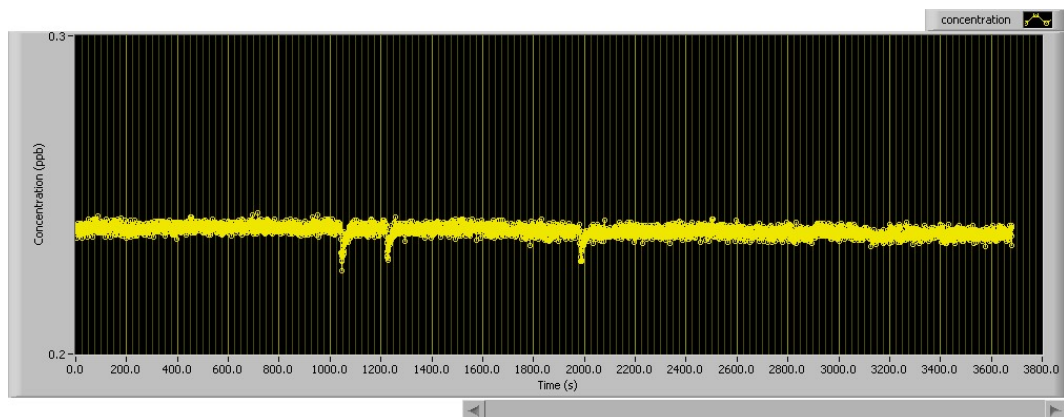


dilakukan secara stabil seperti diperlihatkan pada gambar 17. Hasil yang diperoleh juga sesuai dengan hasil pengukuran sebelumnya.



Gambar 17. Hasil pengukuran konsentrasi CO sebesar 1 ppmv pada tekanan 80 mBar.

Untuk mengetahui kemampuan detektor yang dikembangkan dalam mengidentifikasi gas CO pada level konsentrasi yang kecil dan di bawah kondisi umum gas hembus pernafasan manusia, maka dilakukan pengukuran gas CO pada konsentrasi sebesar 0,24 ppmv. Hasil pengukuran diperlihatkan pada gambar 18.



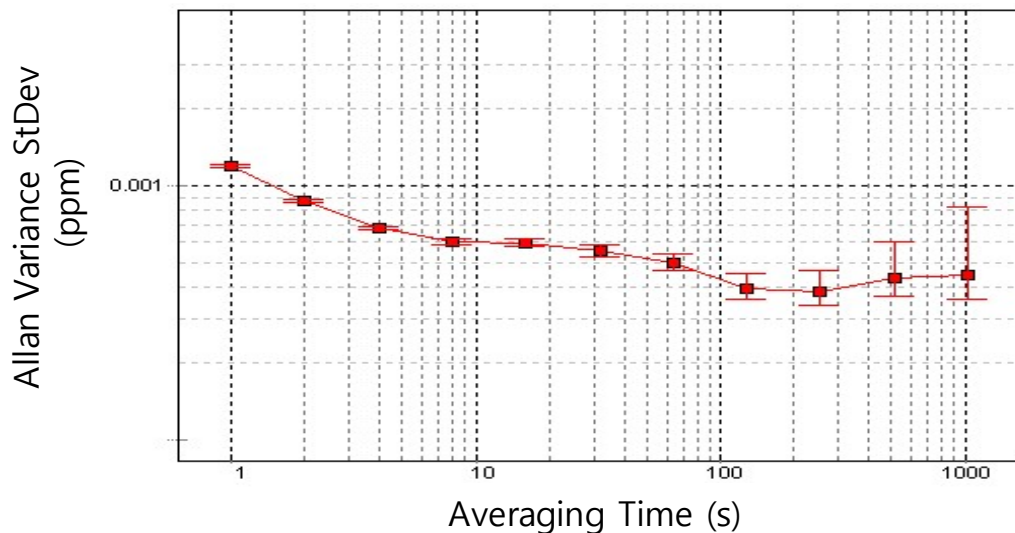
Gambar 18. Hasil pengukuran konsentrasi CO sebesar 0,24 ppmv pada tekanan 80 mBar.

Hasil yang diperoleh juga sesuai dengan hasil-hasil pengukuran sebelumnya. Hasil-hasil di atas memperlihatkan bahwa pengukuran terlihat stabil pada baras konsentrasi yang diinginkan, akan tetapi kualitas detektor harus diperlihatkan pada

kemampuannya untuk menjaga pengukuran pada batas stabil yang diharapkan. Batas kestabilan ini dinamakan batas deteksi pengukuran.

#### 4. 6. Analisa Batas Deteksi Pengukuran gas CO

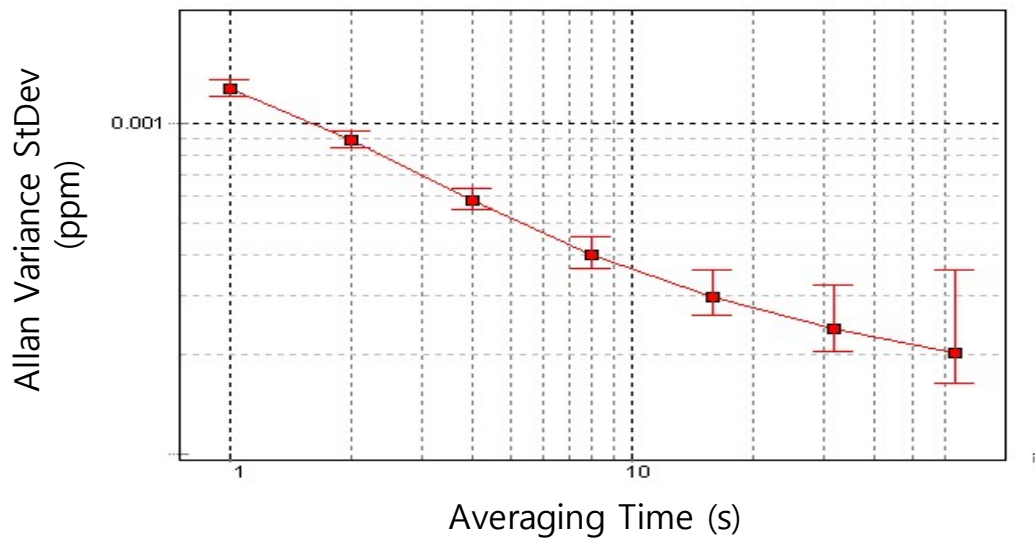
Batas deteksi dari sistem ICOS berbasis QCL, yang akan memberikan gambaran kuantitatif dari kestabilan dan pencapaian kepekaan detektor, diperoleh dengan melakukan analisa data menggunakan standar deviasi dari *Allan variance*. Gambar 19 menampilkan analisa deviasi *Allan variance* pada pengukuran konsentrasi gas CO sebesar 1 ppmv.



Gambar 19. Analisa Allan variance untuk menentukan batas deteksi pada konsentrasi gas CO sebesar 1 ppmv pada tekanan 80 mBar.

Batas deteksi dari gambar 19 ditetapkan sebesar 1 ppbv yang diperoleh dalam waktu kurang dari 2 detik waktu akuisisi. Kepekaan yang lebih baik dapat diperoleh dengan melakukan waktu akuisisi yang lebih lama, yaitu 0,4 ppbv untuk waktu akuisisi 115 s. Hal ini memperlihatkan level kepekaan atau batas deteksi sub-ppb yang diharapkan telah dapat dicapai.

Agar pernyataan kepekaan dan kestabilan detektor yang dikembangkan dapat disimpulkan dengan baik, maka batas deteksi pada pengukuran gas CO dengan konsentrasi sebesar 0,24 ppmv juga dianalisis. Gambar 20 menampilkan analisa deviasi *Allan variance* pada konsentrasi gas CO sebesar 0,24 ppmv.



Gambar 20. Analisa Allan variance untuk menentukan batas deteksi pada konsentrasi gas CO sebesar 0,24 ppmv pada tekanan 80 mBar.

Batas deteksi pada pengukuran konsentrasi 0,24 ppmv yang diperlihatkan pada gambar 20 ditetapkan sebesar 1 ppbv yang juga diperoleh dalam waktu kurang dari 2 detik waktu akuisisi. Kepekaan yang lebih baik dapat diperoleh dengan melakukan waktu akuisisi yang lebih lama, yaitu 0,2 ppbv untuk waktu akuisisi 62 s. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem detektor gas CO menggunakan ICOS berbasis QCL ini terbukti mampu melakukan pengukuran dan pengamatan gas CO dari gas hembus pernapasan dengan tingkat kepekaan yang diinginkan.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Konfigurasi sistem deteksi gas CO berbasis spektroskopi ICOS telah bekerja dengan optimal dan menunjukkan performa yang baik dan memiliki kestabilan yang cukup tinggi. Pengembangan sistem deteksi gas CO yang menerapkan metode spektroskopi ICOS berbasis QCL telah dilakukan dengan baik dengan kepekaan mencapai level sub ppb. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa teknik yang digunakan ini dapat dengan cepat dan peka dalam melakukan pelacakan gas CO, walaupun tidak membutuhkan kestabilan posisi rangkaian yang sensitif. Sistem ini terbukti dapat mendeteksi keberadaan gas CO dengan kepekaan tinggi pada gas kelumit bertekanan rendah. Sistem ini memiliki kemungkinan yang cukup baik untuk dikembangkan sebagai detektor gas jenis lain atau diaplikasikan pada penyelidikan biomedik terutama pada analisa gas hembus pernafasan manusia.

## Daftar Pustaka

- A. Kosterev, G. Wysocki, Y. Bakhirkin, S. So, R. Lewicki, M. Fraser, F. Tittel, R.F. Curl, 2008, *Application of Quantum Cascade Lasers to Trace Gas Analysis*, Appl. Phys. B 90, 165–176 (2008).
- Anthony O’Keefe, 1998, *Integrated cavity output analysis of ultra-weak absorption*, Chemical Physics Letters, 293 1998:331–336.
- Anthony O’Keefe, James J. Scherer, Joshua B. Paul, 1999, *cw Integrated cavity output spectroscopy*, Chemical Physics Letters, 307, 1999:343–349.
- Baldwin A D, 1977, *Anstie’s alcohol limit: Francis Edmund Anstie 1833–1874*, Am. J. Public Health, 67 679–81.
- B. P. J. de Lacy Costello, R. J. Ewen, N. M. Ratcliffe, A sensor system for monitoring the simple gases hydrogen, carbon monoxide, hydrogen sulfide, ammonia and ethanol in exhaled breath, 2008, J. Breath Res. 2 (2008) 037011
- Chuji Wang and Peeyush Sahay, 2009, *Breath Analysis Using Laser Spectroscopic Techniques: Breath Biomarkers, Spectral Fingerprints, and Detection Limits*, Sensors 2009, 9, 8230-8262.
- D. Marchenko, J. Mandon, S. M. Cristescu, P. J. F. M. Merkus, F. J. M. Harren, 2013, *Quantum cascade laser-based sensor for detection of exhaled and biogenic nitric oxide*, Appl. Phys. B (2013) 111:359–365.
- D. S. Baer, J. B. Paul, M. Gupta, dan A. O’Keefe, 2002, *Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy*, Appl. Phys. B **75**, 261-265 (2002).
- Duveen D I and Klickstein H S, 1955, *Antoine Laurent Lavoisier’s Contributions to Medicine and Public Health*, Bull. Hist. Med. 29 164–79.
- F. Lapostolle, H. Gurlain, M.N. Pizagalli, P. Le Toumelin, F. Adnet, M. Galliot, C. Lapandry, S.W. Borron, 2004, *Measurement of carbon monoxide in simulated expired breath*, Resuscitation, Vol. 64, Elsevier Publication (2004), p. 201 – 204.
- G. S. Engel, W. S. Drisdell, F. N. Keutsch, E. J. Moeyr, and J. G. Anderson, 2006, *Ultrasensitive near-infrared integrated cavity output spectroscopy technique for detection of CO at 1.57  $\mu\text{m}$ : new sensitivity limits for absorption measurements in passive optical cavities*, Appl. Opt. **45**, 9221-9229 (2006).
- Jagadeeshwari Manne, Alan Lim, Wolfgang Jäger, John Tulip, 2010, *Off-axis cavity enhanced spectroscopy based on a pulsed quantum cascade laser for sensitive detection of ammonia and ethylene*, APPLIED OPTICS, Vol. 49, No. 28, 1 October 2010.
- Joshua B. Paul, Larry Lapon, and James G. Anderson, 2001, *Ultrasensitive absorption spectroscopy with a high-finesse optical cavity and off-axis alignment*, APPLIED OPTICS, Vol. 40 No. 27, 20 September 2001:4904–4910.
- Julien Mandon, Marieann Högman, Peter J. F. M. Merkus, Jan van Amsterdam, Frans J. M. Harren, Simona M. Cristescu, 2012, *Exhaled nitric oxide monitoring by quantum cascade laser: comparison with chemiluminescent*

- and electrochemical sensors, *Journal of Biomedical Optics* 17(1), 017003 (January 2012).
- J. Wojtas, Z. Bielecki, T. Stacewicz, J. Mikołajczyk, M. Nowakowski, 2012, *Ultrasensitive laser spectroscopy for breath analysis*, *OPTOELECTRONICS REVIEW*, 20(1):26–39.
- Lei Tao, Kang Sun, M. Amir Khan, David J. Miller, Mark A. Zondlo, 2012, *Compact and portable open-path sensor for simultaneous measurements of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO using a quantum cascade laser*, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 20, No. 27: pp. 28106–28118 (17 December 2012).
- L.S. Rothman, I.E. Gordon, A. Barbe, D. Chris Benner, P.F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L.R. Brown, A. Campargue, J.P. Champion, K. Chance, L.H. Coudert, V. Dana, V.M. Devi, S. Fally, J.M. Flaud, R.R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W.J. Lafferty, J.Y. Mandin, S.T. Massie, S.N. Mikhailenko, C.E. Miller, N. Moazzen Ahmadi, O.V. Naumenko, A.V. Nikitin, J. Orphal, V.I. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi Cross, C.P. Rinsland, M. Rotger, M. Šimečková, M.A.H. Smith, K. Sung, S.A. Tashkun, J. Tennyson, R.A. Toth, A.C. Vandaele, J. Vander Auwera, 2009, *The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110 (2009) 533–572, doi:10.1016/j.jqsrt.2009.02.013.
- Marcus Sowa, Manfred Mürtz, Peter Hering, 2010, *Mid-infrared laser spectroscopy for online analysis of exhaled CO*, *JOURNAL OF BREATH RESEARCH* 4(2010) 047101 (6pp).
- Matthew R McCurdy, Yury Bakhirkin, Gerard Wysocki, Rafal Lewicki, Frank K Tittel, 2007, *Recent Advances of Laser Spectroscopy Based Techniques for Applications in Breath Analysis*, *JOURNAL OF BREATH RESEARCH*, 1(2007) 014001.
- Meigui Zhou, Yong Liu, Yixiang Duan, 2012, *Breath Biomarkers in Diagnosis of Pulmonary Diseases*, *Clinica Chimica Acta*, 413 (2012) 1770–1780.
- Michael Phillips, 1992, *Breath Tests in Medicine*, *Scientific American*, July, p.74-79.
- Michelle L. Silva, Richard T. Wainner, David M. Sonnenfroh, David I. Rosen, Mark G. Allen, Terence H. Risby, 2005, *Mid-infrared Detection of Trace Biogenic Species Using Compact QCL Based Integrated Cavity Output Spectroscopy (ICOS)*, *Proc. SPIE 6010 Infrared to Terahertz Technologies for Health and the Environment*, 60100E (November 17, 2005).
- P. Werle, R. Mücke, F. Slemr, 1993, *The Limits of Signal Averaging in Atmospheric Trace-Gas Monitoring by Tunable Diode-Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)*, *Applied Physics B*, August 1993, Volume 57, issue 2, pp 131-139.
- Raed A Dweik and Anton Amann, 2008, *Exhaled Breath Analysis: the New Frontier in Medical Testing*, *JOURNAL OF BREATH RESEARCH*, 2(2008), editorial.
- R. Barron-Jimenez, J.A. Caton, T.N. Anderson, R.P. Lucht, T. Walther, S. Roy, M.S. Brown, J.R. Gord, 2006, *Application of a difference-frequency-mixing based diode-laser sensor for carbon monoxide detection in the 4.4–4.8μm spectral region*, *Appl. Phys. B* 85, 185–197 (2006).

- S.M. Cristescu, S.T. Persijn, S. Te Lintel Hekkert, F.J.M. Harren, 2008, *Laser-Based Systems for Trace Gas Detection in Life Sciences*, Applied Physics B, 92, 343–349 (2008).
- Thomas Fritsch, Peter Hering and Manfred Mürtz, 2007, *Infrared laser spectroscopy for online recording of exhaled carbon monoxide—a progress report*, JOURNAL OF BREATH RESEARCH, 1(2007) 014002 (8pp).
- T. H. Risby and F. K. Tittel, 2010, *Current Status of Midinfrared Quantum and Interband Cascade Lasers for Clinical Breath Analysis*, Opt. Eng. 49(11), 111123.
- Yufei Ma, Rafał Lewicki, Manijeh Razeghi, Frank K. Tittel, 2013, *QEPAS based ppb-level detection of CO and N<sub>2</sub>O using a high power CW DFB-QCL*, OPTICS EXPRESS, Vol. 21, No.1: pp.1008–1019 (14 January 2013).

## LAPORAN PENGGUNAAN KEUANGAN

<b>1. HONOR</b>				
Honor	Honor/jam (Rp)	Waktu (Jam/minggu)	Minggu	Honor (Rp)
Ketua peneliti	5.500	20	32	3.520.000
<b>SUB TOTAL</b>				<b>3.520.000</b>
<b>2. PERALATAN PENUNJANG DAN BAHAN HABIS</b>				
Material	Justifikasi Pemakaian	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Harga (Rp)
Software simulasi Spectral Simulation R	Pemodelan	1 lisensi	5.850.000	5.850.000
Lisensi HIRTRAN Database 2008	Pemodelan	1 lisensi	2.350.000	2.350.000
Sewa komputer laptop	Pengolah data	Sewa 8 bulan	8.225.000	8.225.000
Sewa kamera digital	Rekam data	Sewa 8 bulan	6.680.000	6.680.000
Kabel-kabel dan komponen	Sistem elektrk	1 paket	575.000	575.000
Gas N <sub>2</sub> ukuran 10 m <sup>3</sup>	Pelarut	1 tabung	2.255.000	2.255.000
Gas CO ukuran 6 m <sup>3</sup>	Cuplikan	1 tabung	2.775.000	2.775.000
Selang silikon	Sistem gas	40 m	20.000	800.000
Plat alumunium	Sistem gas	1 lembar	3.500.000	3.500.000
Tabung sel alumunium	Sel cuplikan	3 unit	750.000	2.250.000
Komponen elektronik	Sistem elektrk	1 paket	204.000	204.000
Komponen elektronik	Sistem elektrk	1 paket	426.000	426.000
Komponen elektronik	Sistem elektrk	1 paket	2.650.000	2.650.000
Komponen elektronik	Sistem elektrk	1 paket	208.000	208.000
Bahan pembuatan rangkaian elektronik	Sistem elektrk	1 paket	230.000	230.000
Bahan pembuatan rangkaian elektronik	Sistem elektrk	1 paket	200.000	200.000
Digital Receiver	Sistem elektrk	1 buah	300.000	300.000
Harddisk ekst. 1 TB	Penyimpan	1 unit	974.000	974.000
<b>SUB TOTAL</b>				<b>40.452.000</b>
<b>3. LAIN-LAIN</b>				
Kegiatan	Justifikasi	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Biaya (Rp)
Kertas, milimeter block, isolasi,	ATK	1 paket	644.000	644.000
Kertas, alat tulis , cutter	Pelaporan	1 paket	354.000	354.000
Kertas Cromo	ATK	66 lembar	2.900	190.000
Bensin premium	Perjalanan	99 liter	7.400	750.000
Bensin premium	Yogya-JKT	66 liter	7.400	500.000
Bensin premium	JKT - Yogya	33 liter	7.400	250.000
Canon CL 811Colour	Pelaporan	2 unit	235.000	470.000
Canon CL 810 B/W	Pelaporan	2 unit	185.000	370.000
<b>SUB TOTAL</b>				<b>3.528.000</b>
				<b>TOTAL Rp 47.500.000</b>





LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT  
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA

BERITA ACARA SEMINAR HASIL PENELITIAN

No. FRM/LPPM-PNL/314

Revisi : 00

Tgl 1 September 2014

Hal 1 dari 1

1. Nama Peneliti : Restu Widiatmono, SS, MS,  
2. Jurusan/Prodi : FMIPA  
3. Fakultas : Pendidikan Dokter  
4. Skim Penelitian : Penelitian Disertasi Doktor  
5. Judul Penelitian : Pengembangan Sistem Deteksi Gas CO Berbasis Sensor  
Tipe 1 pada Gas Keluasan Berbahaya, Ruang Berlangit  
6. Pelaksanaan : Tanggal 16 Nov Jam 09.00 - Selesai Splettrushop 1005  
7. Tempat : Ruang Sidang LPPM, Universitas Negeri Yogyakarta  
8. Dipimpin oleh : Ketua Prof. Dr. C. Asti Budiningsih  
Sekretaris Dr. Kaban Komang  
9. Peserta yang hadir : a. Konsultan : ..... orang  
b. Nara sumber : ..... orang  
c. BPP : ..... orang  
d. Peserta lain : ..... orang  
Jumlah : ..... orang

SARAN-SARAN

Tugasan hasil Dokter - sebagai tugas - Ujian Dokter.

10. Hasil Seminar;

Setelah mempertimbangkan penyajian, penjelasan, argumentasi serta sistematika dan tata tulis, seminar berkesimpulan: hasil penelitian tersebut di atas:

- Diterima, tanpa revisi/pembenahan usulan/instrumen/hasil
- Diterima, dengan revisi/pembenahan
- Dibenahi untuk diseminarkan ulang

Ketua Sidang

Mengetahui  
Reviewer

Sekretaris Sidang

Prof. Dr. C. Asti Budiningsih  
NIP: 19562111903032001

Prof. Dr. Herminoro Satrio  
NIP: 19542091978031005

Dr. Kaban Komang  
NIP: 196008081904

**HARI : SENIN / 16 November 2015**  
**WAKTU : 09.00 WIB - selesai**  
**TEMPAT : Gedung LPPM UNY Lt. 2**

NO.	NAMA	FAK	SKIM	TANDA TANGAN
1	Drs. Kusnadi, M.Pd.	FBS	Penelitian Disertasi Doktor	1
2	Drs. Hadjar Pamadhi, MA.Hons.	FBS	Penelitian Hibah Bersaing	2
3	Prof. Dr. Trie Hartiti Retnowati, M.Pd.	FBS	Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi	3
4	Dr. Drs. Margana, M.Hum.,M.A.	FBS	Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi	4
5	Dr. Ratna Candra Sari, SE.Ak., M.Si.	FE	Kerjasama Luar Negeri dan Publikasi Internasional	5
6	Prof. Drs. Suyanto, M.Ed.,Ph.D.	FE	Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi	6
7	Ahmad Rithaudin, S.Pd. Jas., M.Or.	FIK	Pendidikan Karakter	7
8	Drs. Fauzi, M.Si.	FIK	Penelitian Disertasi Doktor	8
9	Faidillah Kurniawan, S.Pd.Kor., M.Or.	FIK	Penelitian Hibah Bersaing	9
10	Dr. Suwarjo, M.Si.	FIP	Penelitian Hibah Bersaing	10
11	Prof. Dr. Yoyon Suryono, MS.	FIP	Penelitian Tim Pasca Sarjana	11
12	Dra. Purwandari, M.Si.	FIP	Penelitian Hibah Bersaing	12
13	Dr. Ali Muhtadi, S.Pd.,M.Pd.	FIP	Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi	13
14	Prof. K.H. Sugijarto, M.Sc.,Ph.D.	FMIPA	Penelitian Tim Pasca Sarjana	14
15	Restu Widiatmono, S.Si.,M.Si.	FMIPA	Penelitian Disertasi Doktor	15
16	Supardi, S.Si., M.Si.	FMIPA	Penelitian Disertasi Doktor	16